

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-082235
(43)Date of publication of application : 22.03.2002

(51)Int.Cl. G02B 6/10
G02B 6/16

(21)Application number : 2001-180283 (71)Applicant : FUJIKURA LTD
(22)Date of filing : 14.06.2001 (72)Inventor : SAKAMOTO AKIRA
SUDO MASAOKI
KOJIMA REIKO
INADA TOMOSADA
OKUDE SATOSHI
NISHIDE KENJI

(30)Priority
Priority number : 2000183796 Priority date : 19.06.2000 Priority country : JP

(54) SLANT TYPE SHORT PERIOD GRATING

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a slant type short period grating capable of obtaining a loss peak in a narrow band of the wavelength spectrum of transmitted light.

SOLUTION: A core 1 consists of quartz glass to which photosensitive dopant for changing the refractive index of the quartz glass by the irradiation of light is added. In the case of forming the slant type short period grating forming a grating part 4 by irradiating an optical fiber to be a photosensitive layer consisting of quartz glass to which the photosensitive dopant is added with light from a layer of a clad 2, i.e., at least a layer adjacent to the core 1 and changing the grating part 4 at a prescribed slant angle in a prescribed grating period, the outer diameter of the core 1 is set up to $\geq 5 \mu\text{m}$ and the relative photosensitive ratio of the core 1 to the photosensitive layer of the clad 2 is designed so as to satisfy a prescribed expression.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number]
[Date of registration]
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開 2002-82235

(P 2002-82235 A)

(43) 公開日 平成14年3月22日 (2002. 3. 22)

(51) Int. Cl. 7

識別記号

F I

フォーマット (参考)

G 0 2 B 6/10

G 0 2 B 6/10

C 2H050

6/16

6/16

審査請求 未請求 請求項の数 2 3

O L

(全 2 5 頁)

(21) 出願番号 特願2001-180283 (P2001-180283)

(22) 出願日 平成13年6月14日 (2001. 6. 14)

(31) 優先権主張番号 特願2000-183796 (P2000-183796)

(32) 優先日 平成12年6月19日 (2000. 6. 19)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005186

株式会社フジクラ

東京都江東区木場1丁目5番1号

(72) 発明者 坂元 明

千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ佐倉事業所内

(72) 発明者 須藤 正明

千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジクラ佐倉事業所内

(74) 代理人 100064908

弁理士 志賀 正武 (外3名)

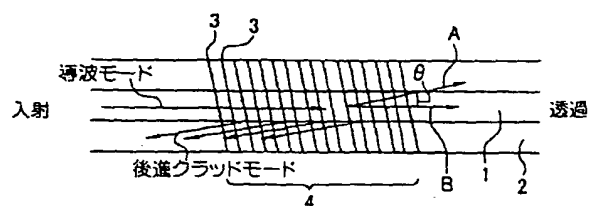
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スラント型短周期グレーティング

(57) 【要約】

【課題】 透過光の波長スペクトルにおいて、狭い帯域に損失ピークが得られるスラント型短周期グレーティングを提供する。

【解決手段】 コア1が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなり、クラッド2の少なくとも前記コアに隣接する層が、光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部4を形成したスラント型短周期グレーティングを形成するにあたって、前記コア1の外径を5 μ m以上とし、該コア1の前記クラッド2の光感受層に対する相対光感受率が、所定の式を満足する様に設計する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、

該コアが、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなり、

該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくとも前記コアに隣接する層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を*10

*照射し、

前記コアと前記クラッドの光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向に所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、

前記コアの外径が5μm以上であり、
該コアに隣接する前記クラッドの光感受層に対する、当該コアの相対光感受率が、以下の式(1)

$$0.2 - 0.1 \cdot (V - 1.7) \leq P \leq 0.1a \{0.41 - 0.33 \cdot (V - 1.7)\} \quad \dots(1)$$

(式中、aはコアの外径(単位: μm)、Vは正規化周波数、Pは、該コアに隣接する前記クラッドの光感受層に対する、当該コアの相対光感受率)を満足し、

かつ前記スラント角度が導波モードの反射モードへの結合による損失が極小値になる角度に設定されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの外径が7μm以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの相対光感受率が0.1~0.4であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 4】 請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記クラッドの光感受層の外径が、前記コアの外径の4倍以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 5】 請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの外径が12μm以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 6】 請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載のス※

$$P \leq m_1(V - 2) + m_2$$

$$m_1 = 0.0041667a^4 - 0.13519a^3 + 1.6206a^2 - 8.511a + 16.291$$

$$m_2 = -0.0083827a^2 + 0.18344a - 0.6912 \quad \dots(2)$$

ただし、Pの数値範囲が0以下もしくは虚数となった場合は

Pは0とする

(式中、aはコアの外径(単位: μm)、Vは正規化周波数、Pは、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 9】 コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、

該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英

※スラント型短周期グレーティングにおいて、前記コア-前記クラッドの比屈折率差が0.5%以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項 7】 請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアにアルミニウムまたはリンが添加されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

20 【請求項 8】 コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、

該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、

該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向に所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、

30 前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率が、以下の式(2)

【数 2】

ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、

該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向に所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、

前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率が、以下の式(3)

【数 3】

$$P \geq (V - 1.7868)^{0.048522} + 0.17416V - 1.121 \quad \dots(3)$$

ただし、 P の数値範囲が0以下もしくは虚数となった場合は

P は0とする

(式中、 a はコアの外径(単位: μm)、 V は正規化周波数、 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項10】 コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、
該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英*

$$P \geq m1(a - m2)^{m3} \quad \dots(4)$$

$$m1 = -0.28947 + 0.17702V$$

$$m2 = -344.28 + 543.53V - 272.8V^2 + 44.494V^3$$

$$m3 = 0.96687 - 0.24791V$$

ただし、 P の数値範囲が0以下もしくは虚数となった場合は

P は0とする

(式中、 a はコアの外径(単位: μm)、 V は正規化周波数、 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項11】 請求項8～10のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、導波モードの反射モードへの結合による損失が極小値になるスラント角度が設定されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項12】 請求項8～11のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記光感受層に対する前記コアの相対光感受率が0.2以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項13】 請求項8～12のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記グレーティング周期がチャープトピッチであり、該グレーティング周期のチャープ率が20nm/cm以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項14】 請求項1～13のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、波長1550nm、かつ直径60mmの巻き径の条件下における、前記光ファイバの曲げ損失が、1dB/m以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項15】 請求項1～14のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、波長1550nm、かつ直径40mmの巻き径の条件下における、前記光ファイバの曲げ損失が、0.1dB/m以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーテ

*ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、

該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向に所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部を形成したスラント

10 型短周期グレーティングであって、

前記光感受層に対する前記コアの相対光感受率が、以下の式(4)

【数4】

イング。

【請求項16】 請求項1～15のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、当該スラント型短周期グレーティングの動作波長における前記光ファイバの導波モードのモードフィールド径が15 μm 以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項17】 請求項1～16のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記光感受層の外径が、当該スラント型短周期グレーティングの動作波長における前記光ファイバの導波モードのモードフィールド径の1.5倍以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項18】 請求項1～17のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記光感受層の外径が60 μm 以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項19】 請求項1～18のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記グレーティング部の長さが1～100mmであることを特徴とするスラント型短周期グレーティング。

【請求項20】 請求項1～19のいずれか一項に記載のスラント型短周期グレーティングと、光増幅器とを備えた光増幅器モジュールであって、当該スラント型短周期グレーティングによって該光増幅器の利得等化を行うものであることを特徴とする光増幅器モジュール。

【請求項21】 請求項20に記載の光増幅器モジュールにおいて、前記光増幅器がエルビウム添加光ファイバ増幅器であることを特徴とする光増幅器モジュール。

【請求項 22】 請求項 20 または 21 に記載の光増幅器モジュールを用いたことを特徴とする光通信システム。

【請求項 23】 請求項 1～19 のいずれか一項に記載の条件を満足するように、スラント型短周期グレーティングを設計し、製造することを特徴とするスラント型短周期グレーティングの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光通信分野などにおいて、光フィルタなどとして用いられるスラント型短周期グレーティングに関する。

【0002】

【従来の技術】 ファイバ型の光フィルタの一例として光ファイバグレーティングがある。光ファイバグレーティングには、長周期グレーティング (LPG) と短周期グレーティング (SPG) がある。光ファイバグレーティングは、従来は、コアに、その長さ方向に所定のグレーティング周期で屈折率の変化を形成したものである。なお、グレーティング周期とは、この屈折率変化の周期のことである。LPG のグレーティング周期は数百 μm 程度である。LPG においては、屈折率の変化を形成したグレーティング部において、入射光のうち、所定の波長域の光が入射光と同方向に進行する前進クラッドモードと結合し、この波長域の光が損失した透過光が得られる。これに対して SPG はグレーティング周期が、光の波長の半分～ $1/3$ 程度のものである。つまり、動作波長が $1.55\mu\text{m}$ 付近であれば、例えばその $1/3$ 程度の値が設定される。その結果、光ファイバのコアを伝搬する導波モードのうち、所定の波長域の光が反射して反射モードと結合し、この光が損失した透過光が得られる。

【0003】 LPG においては、信号波形の劣化の原因となる微小リップルが存在しないという利点がある。微小リップルとは、波長を横軸、透過率を縦軸にとった透過光の波長スペクトルにおける微小な変動のことである。そのため、LPG は波長スペクトルにおいては滑らかな特性が得られる。また、反射光が殆ど存在しないことも利点のひとつである。しかしながら、透過特性の調整が困難で任意の透過特性を得難いという欠点がある。

【0004】 SPG においては、グレーティング周期やグレーティング部の屈折率変化量などの他、グレーティング周期を長さ方向にそって徐々に拡大、あるいは縮小させて変化させるチャプットグレーティングを適用することによって、損失光の波長帯域を広くしたり、損失光の強度を調整することができ、比較的自由に任意の透過特性を実現することができる。しかしながら、SPG においては、反射光の作用によって多重反射が生じ、その結果、透過光の波長スペクトルにおいて、微小リップルを生じ、滑らかな波長スペクトル特性が得られないとい

う問題がある。また、反射光が大きいという問題もある。そこで、最近では、SPG の設計の自由度を生かし、さらに微小リップルが生じにくいスラント型 SPG の開発が進められている。

【0005】 図 24 はスラント型 SPG の一例を示した側断面図である。以下、このスラント型 SPG の製造方法にそって説明する。図中符号 1 はコアであって、このコア 1 の外周上に、このコア 1 よりも低い屈折率を備えたクラッド 2 が設けられて光ファイバが構成されている。コア 1 とクラッド 2 は石英系ガラスからなり、コア 1 には、特定波長の光を照射することによって石英ガラスの屈折率を上昇させる光感受性のドーパントが添加されている。光感受性のドーパントとしては、通常ゲルマニウムが用いられる。ゲルマニウムを添加した石英ガラスに 240nm 付近の紫外光を照射すると、屈折率が上昇する。したがって、位相マスクなどを介することにより、光ファイバの一側面より、コア 1 の長さ方向にそって所定のグレーティング周期で光を照射すると、光が照射された部分のコア 1 の屈折率が上昇し、複数の高屈折率部 3、3…が所定グレーティング周期で配列されたグレーティング部 4 が得られる。

【0006】 高屈折率部 3、3…はコア 1 を横切るように、かつコア 1 の中心軸 B に直交せず、斜めに形成されている。そして、複数の高屈折率部 3、3…がコア 1 の長さ方向にそって相互に平行に配列されている。高屈折率部 3 に直交する線 A の方向をグレーティング方向という。あるいはグレーティング部の格子ベクトル方向という。そして、このグレーティング方向 A とコア 1 の中心軸 B との角度 θ をスラント角度といい、この θ によって高屈折率部 3 の傾きの大きさを表す。なお、通常の SPG は、グレーティング方向がコア 1 の中心軸と一致しており、 θ はゼロである。

【0007】 その結果、入射方向と同じ方向にコア 1 を進行する導波モードがグレーティング部 4 において反射された光は、クラッド 2 に放出され、入射光と逆行する後進クラッドモードと結合する。すなわち、コア 1 を逆行する反射モードと結合しないため、多重反射が生じにくくなる。そして、波長スペクトルにおいて得られる微小リップルの強度を小さくすることができる。

【0008】 図 25 (a)、図 25 (b)、図 26

(a)、図 26 (b) は、スラント角度を変化させた場合の波長スペクトルを示したものである。なお、導波モードは複数の後進クラッドモードと結合するため、波長スペクトルにおいては複数の損失ピークが近接して並列している。スラント角度を 0 度、2.9 度、4 度、5.8 度と増加すると、導波モードの反射モードへの結合は、4 度において最小となり、さらにこのスラント角度が 5.8 度に増加すると、前記結合が再び増加する。すなわち、スラント角度の増加に伴って、反射モードへの結合が増加、減少を繰り返す周期的な特性を奏する。こ

の反射モードへの結合が最初に極小値となる角度を反射抑制角と呼ぶことにする（この例においては図 26

(a) に示した様に 4 度）。スラント型 SPG においては、スラント角度を反射抑制角付近に設定すると、微小リップルの影響を小さくすることができる。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし、コアと、その外周上に設けられ、このコアよりも低い屈折率を備えたクラッドとを有し、コアがゲルマニウム添加石英ガラスからなり、クラッドが純粋石英ガラスからなる一般的なシングルモード光ファイバを用いたスラント型 SPG においては、スラント角度を反射抑制角付近に設定すると、導波モードがクラッドモードに結合する帯域が広くなり、急峻な波長スペクトルが得られないという欠点がある。図 27 は、この様な一般的なシングルモード光ファイバのコアに、一定のグレーティング周期で、スラント短周期型のグレーティング部を、スラント角度が反射抑制角付近になる様に形成したスラント型 SPG の透過光の波長スペクトルの一例を示したものである。損失帯域（損失ピークの帯域）は 20 nm 以上に及んでいる。またスラント型 SPG においては、透過光の波長スペクトルにおいて得られる損失ピークが大きい波長帯域をメインバンド、メインバンドの短波長側にあらわれる小さい波長帯域をサイドバンド、という様に、分けることができる場合がある。そして、メインバンドの損失ピークの長波長側の部分に不要なゴーストモードのピークが存在する場合や、メインバンドの損失ピークに並列する様に現れるノイズとなるサイドバンドの透過損失が大きくなる場合がある。ゴーストピークが存在したり、サイドバンドの透過損失が大きくなったりすると、実質的には十分に損失帯域を狭くすることができず、急峻な波長スペクトルは得られない場合がある。また、同じ露光量、つまり同じ屈折率変化を与えても、透過損失のメインバンドの面積（以下、「透過損失面積」という場合がある。）が小さい場合は、同じフィルタ特性を得るのに長く露光しなければならないため、製造上不利となる。

【0010】この様にスラント型 SPG においては、急峻な波長スペクトル、ゴーストモードのピークの低減、サイドバンドの透過損失の低減、透過損失面積の拡大などの種々の課題があり、所望の特性を得ることが困難な* 40

$$0.2 - 0.1 \cdot (V - 1.7) \leq P \leq 0.1a \{0.41 - 0.33 \cdot (V - 1.7)\} \quad \cdots (1)$$

（式中、a はコアの外径（単位：μm）、V は正規化周波数、P は、該コアに隣接する前記クラッドの光感受層に対する、当該コアの相対光感受率）を満足し、かつ前記スラント角度が導波モードの反射モードへの結合による損失が極小値になる角度に設定されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第 2 の発明は、前記第 1 の発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの外径が 7 μm 以上であること

* 場合があり、光学特性の設計の自由度は、未だ充分ではなかった。特に狭い損失帯域を得ることは困難な場合があった。スラント型 SPG は、例えばエルビウム (Er) 添加光ファイバ増幅器の波長-利得特性を等化するために用いられる。スラント型 SPG は、前記 Er 添加光ファイバ増幅器の利得-波長特性の光学特性に対応する様に、種々の設計ができるものが好ましい。そして、このときゴーストモードやサイドバンドの大きさが問題とならないものが好ましい。

【0011】本発明は前記事情に鑑みてなされたもので、自由に光学特性を設計することができるスラント型 SPG を提供することを課題とする。具体的には、透過光の波長スペクトルにおいて、狭い損失帯域を備えたスラント型 SPG を提供することを課題とする。さらに同じ屈折率変化で、より透過損失面積の大きいスラント型 SPG を提供することを課題とする。さらに、ゴーストモードのピークを低減したスラント型 SPG を提供することを課題とする。さらに、サイドバンドの透過損失の低減を図ることができるスラント型 SPG を提供することを課題とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明においては以下の様な解決手段を提案する。第 1 の発明は、コアと該コアの外周上に設けられたクラッドとを有し、該コアが、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなり、該クラッドが、1 層または 2 層以上からなり、少なくとも前記コアに隣接する層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、前記コアと前記クラッドの光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向にそって所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもって変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、前記コアの外径が 5 μm 以上であり、該コアに隣接する前記クラッドの光感受層に対する、当該コアの相対光感受率が、以下の式

(1)

【数 5】

を特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第 3 の発明は、前記第 1 または第 2 の発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの相対光感受率が 0.1 ~ 0.4 であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第 4 の発明は、前記第 1 ~ 3 のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記クラッドの光感受層の外径が、前記コアの外径の 4 倍以上であることを特徴とするスラント型

短周期グレーティングである。第5の発明は、前記第1～4の発明のいずれかのスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアの外径が $12\mu\text{m}$ 以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第6の発明は、前記第1～5のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コア-前記クラッドの比屈折率差が 0.5% 以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第7の発明は、前記第1～6のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記コアにアルミニウムまたはリンが添加されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第8の発明は、コアと該*

$$P \leq m_1(V-2) + m_2$$

$$m_1 = 0.0041667a^4 - 0.13519a^3 + 1.6206a^2 - 8.511a + 16.291$$

$$m_2 = -0.0083827a^2 + 0.18344a - 0.6912 \quad \dots(2)$$

ただし、 P の数値範囲が 0 以下もしくは虚数となった場合は

P は 0 とする

(式中、 a はコアの外径(単位: μm)、 V は正規化周波数、 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第9の発明は、コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを※

$$P \geq (V-1.7868)^{0.048522} + 0.17416V - 1.121 \quad \dots(3)$$

ただし、 P の数値範囲が 0 以下もしくは虚数となった場合は

P は 0 とする

(式中、 a はコアの外径(単位: μm)、 V は正規化周波数、 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第10の発明は、コアと該コアの外周上に設けられたクラッドを有し、該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパント★

$$P \geq m1(a-m2)^{m3}$$

$$m1 = -0.28947 + 0.17702V$$

$$m2 = -344.28 + 543.53V - 272.8V^2 + 44.494V^3$$

$$m3 = 0.96687 - 0.24791V$$

ただし、 P の数値範囲が 0 以下もしくは虚数となった場合は

P は 0 とする

(式中、 a はコアの外径(単位: μm)、 V は正規化周波数、 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率)を満たすことを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第11の発明は、前記第8～10のいずれかの発明のス

*コアの外周上に設けられたクラッドを有し、該クラッドが、1層または2層以上からなり、少なくともそのうちの1層が、光の照射によって石英ガラスの屈折率を変化させる光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向にそって所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもつて変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率が、以下の式(2)

【数6】

※添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向にそって所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもつて変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率が、以下の式(3)

【数7】

★を添加した石英ガラスからなる光感受層である光ファイバに光を照射し、該光感受層の屈折率を、当該光ファイバの長さ方向にそって所定のグレーティング周期で所定のスラント角度をもつて変化させてグレーティング部を形成したスラント型短周期グレーティングであって、前記光感受層に対する前記コアの相対光感受率が、以下の式(4)

【数8】

スラント型短周期グレーティングにおいて、導波モードの反射モードへの結合による損失が極小値になるスラント角度が設定されていることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第12の発明は、前記第8～11のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティン

グにおいて、前記光感受層に対する前記コアの相対光感受率が0.2以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第13の発明は、前記第8～12のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記グレーティング周期がチャープトピッチであり、該グレーティング周期のチャープ率が20nm/cm以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第14の発明は、前記第1～13のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、波長1550nm、かつ直径60mmの巻き径の条件下における、前記光ファイバの曲げ損失が、1dB/m以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第15の発明は、前記第1～14のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、波長1550nm、かつ直径40mmの巻き径の条件下における、前記光ファイバの曲げ損失が、0.1dB/m以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第16の発明は、前記第1～15のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、当該スラント型短周期グレーティングの動作波長における前記光ファイバの導波モードのモードフィールド径が15μm以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第17の発明は、第1～16のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記光感受層の外径が、当該スラント型短周期グレーティングの動作波長における前記光ファイバの導波モードのモードフィールド径の1.5倍以上であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第18の発明は、前記第1～17のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記光感受層の外径が60μm以下であることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第19の発明は、前記第1～18のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングにおいて、前記グレーティング部の長さが1～100mmであることを特徴とするスラント型短周期グレーティングである。第20の発明は、前記第1～19のいずれかの発明のスラント型短周期グレーティングと、光増幅器とを備えた光増幅器モジュールであって、当該スラント型短周期グレーティングによって該光増幅器の利得等化を行うものであることを特徴とする光増幅器モジュールである。第21の発明は、前記第20の発明の光増幅器モジュールにおいて、前記光増幅器がエルビウム添加光ファイバ増幅器であることを特徴とする光増幅器モジュールである。第22の発明は、前記第20または21の発明の光増幅器モジュールを用いたことを特徴とする光通信システムである。第23の発明は、前記第1～19のいずれかひとつの発明の条件を満足するように、スラント型短周期グレーティングを設計し、製造することを特徴とするスラント型短周期グレーティングの製造方法である。

【0013】

【発明の実施の形態】1. 第1の実施形態例

本発明者らは、まず、狭い損失帯域を得ること、を目的として検討を行った。以下、本発明の検討の経過を追って、本発明について詳細に説明する。第1の実施形態例においては、実質的にグレーティング周期が一定のスラント型SPGに適用可能な条件であって、「狭い損失帯域」と、「サイドバンドの損失ピークの抑制」、の効果が得られる。上述の様に、スラント型SPGにおいては、透過光の波長スペクトルにおいて得られる損失ピークが大きい波長帯域をメインバンド、メインバンドの短波長側に現れる小さい波長帯域をサイドバンド、という様に、分けることができる場合がある。

【0014】図28は、メインバンドとサイドバンドが存在する波長スペクトルの一例を示したものである。長波長側がメインバンド、短波長側がサイドバンドである。光フィルタにおいては、上述の様にサイドバンドの透過損失がノイズとなる場合がある。また、光フィルタとしては、メインバンドとサイドバンドの透過損失の差が小さい程、設計の自由度が高くなり、好ましい。したがって、「サイドバンドの損失ピークの抑制」が求められる。

【0015】図1は、コアの外径a、正規化周波数V、クラッドにおいて、コアに隣接する光感受層に対するコアの相対光感受率Pの3つのパラメータの設計条件を示したものである。図1に示したように、クラッドはコアに隣接する第1層Cと、その外周上の第2層Dとから構成されている。第1層Cは光感受性のドーパントを添加した石英ガラスからなる光感受層である。この例において、第1層Cの半径は、コア半径a/2の5倍である。また、クラッドの半径は62.5μmである。この設計条件で、上記3つのパラメータが、メインバンドの帯域、およびサイドバンド損失のメインバンド損失に対する比率にどのように影響するかについて説明する。

【0016】グラフ中において、光ファイバの屈折率プロファイルは実線で囲まれている。屈折率プロファイルにおいては、コアの屈折率が最も高く、クラッドの第1層Cと、第2層Dの屈折率は等しく設定されている。なお、第1層Cと第2層Dの屈折率は必ずしも一致している必要はなく、第1層Cの屈折率の方が高い場合、逆に第2層Dの屈折率の方が高い場合も考えられる。光感受性のプロファイルは、縦軸に示した相対光感受率を基準に表されており、一点鎖線で囲まれている。このプロファイルにおいては、第1層Cに光感受性のドーパントが最も多量に添加されている。相対光感受率は、最も多量に光感受性のドーパントが添加されている光感受層（この例においては第1層C）における光感受性のドーパント濃度を1としたときの、他の層（コア、あるいはクラッドを構成する他の層；この例においてはコアと、第2層D）における光感受性のドーパントの添加量の割合で

ある。なお、コア内において、光感受性のドーパントの濃度が一定である必要はない。コア内において光感受性のドーパント濃度が異なる場合は、コア全域で平均化したドーパント濃度から、相対光感受率を算出する。図1からわかる様に、この例においてはコアには少量の光感受性のドーパントが添加され、第2層Dには光感受性のドーパントは添加されていない。

【0017】従来の例においては、コアにのみ光感受性のドーパントを添加した例を示したが、この実施形態例においては、主にクラッドの第1層Cに光感受性のドーパントが添加され、さらにコアにも少量の光感受性のドーパントが添加されている。コアには、相対光感受率を調整するためにゲルマニウムが添加され、屈折率を調整するためにリン、アルミニウムなどが添加されている。リン、アルミニウムは光感受性がなく、かつ屈折率を上昇させる作用を有するドーパントである。クラッドの第1層Cには、光感受性を調整するため、ゲルマニウムが添加され、必要に応じてホウ素、フッ素などが添加され、屈折率が調整されている。第2層Dは、純粋石英ガラス、または屈折率を調整するため、ホウ素、フッ素などを添加した石英ガラスから形成されている。

【0018】なお、この例において検討したコアの外径は、7、8、10 μm の3種である。正規化周波数Vはコアの外径とコアークラッドの比屈折率差によって、以下の式

【0019】

【数9】

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a}{2} \cdot n_{\text{core}} \cdot \sqrt{2\Delta}$$

$$\text{ただし } \Delta = \frac{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}{2n_{\text{core}}^2}$$

【0020】によって定まる。式中、 λ は動作波長、 a はコアの外径（単位： μm ）、 n_{clad} はクラッドの屈折率、 n_{core} はコアの屈折率、 Δ はコアークラッドの比屈折率差である。正規化周波数Vは1.7～2.3の範囲で変化させている。また、コアの相対光感受率は0～0.4の範囲で変化させている。なお、本実施形態例において、スラント型SPGの動作波長は1500～1600nmである。

【0021】そして、まず、コアの外径、正規化周波数、コアの相対光感受率の値を設定した上で、スラント角度を0度から徐々に大きくしていったときに、導波モードの、反射モード（後進LP01モード）への結合による損失が極小値（通常は0～0.01dB程度）となる最初の角度（反射抑制角）にスラント角度を設定している。したがって、本実施例において、反射モードへの結合は殆どない。スラント角度は他の条件によっても異なるが実質的には1.5～8度、好ましくは1.5～6度ある。ついで、この条件で、導波モードのLP0Xモ

ード群への結合と、導波モードのLP1Xモード群への結合について、実効屈折率と結合係数の計算を行った。LP0Xモード群とLP1Xモード群はメインバンドおよびサイドバンドを構成するクラッドモード群である。さらに、この実効屈折率と結合係数を、動作波長1550nm、一定のグレーティング周期でスラント型SPGを作製したときの結合波長（導波モードがクラッドモードと結合する波長）と透過損失に、モード結合理論を用い、それぞれの結合によって生じる透過損失の和をとることにより、変換した。

【0022】図2は計算結果の例を示したグラフである。●はLP0Xモード（LP01、LP02…）と導波モードが結合する波長（結合波長）とそのときの透過損失をプロットしたものである。○はLP1Xモード（LP11、LP12、…）（Xは整数）と、導波モードが結合する波長（結合波長）と、そのときの透過損失をプロットしたものである。なお、メインバンドの損失帯域（メインバンド帯域）は、メインバンドの最長波長側に現れるLP11モードの結合波長から、損失が最小になる最初のLP1Xモードの結合波長までの幅である。図3（a）～図5（b）は、コアの外径 a 、正規化周波数V、コアの相対光感受率Pを変化させて、同様に反射モードへの結合が最小になるスラント角度（反射抑制角）を求め、計算を行い、各条件についてメインバンド帯域と、サイドバンド／メインバンド損失を求めた結果を示したものである。

【0023】図3（a）、図3（b）は、それぞれ、コアの外径7 μm のときのコアの相対光感受率とメインバンド帯域との関係と、コアの相対光感受率とサイドバンド／メインバンド損失比との関係を示したグラフである。結果は正規化周波数ごとにまとめられている。

【0024】図4（a）、図4（b）は、コアの外径8 μm の場合の同様のグラフである。図5（a）、図5（b）は、コアの外径10 μm の場合の同様のグラフである。なお、メインバンド損失はメインバンドの透過損失のピークトップの値、サイドバンド損失は、サイドバンドの透過損失のピークトップの値である。これらのグラフより、メインバンド帯域はコアの相対光感受率が大きくなると大きくなることがわかる。すなわち、コアの相対光感受率が大きいとコアの屈折率変化量が大きくなるため、反射モードへの結合が生じやすくなる。したがって、これを防ぐためにスラント角度を大きくする必要が生じる。そして、メインバンド帯域はスラント角度が大きくなると大きくなる傾向があるため、結果としてメインバンド帯域が大きくなる。

【0025】メインバンド帯域は、コアの外径と正規化周波数にも比較的大きく依存している。メインバンド帯域は、コアの外径が大きくなると狭くなり、正規化周波数Vが小さくなると狭くなる傾向がある。すなわち、コアの外径が大きくなるとファイバ断面において光が広が

る傾向があり、また、同じコアの外径であれば、正規化周波数が小さいと、コアークラッド比屈折率差が小さくなって、同様に光が広がる傾向にある。スラント型SPGにおいては、ファイバ断面方向にも周期構造が存在するが、断面方向における位相整合条件が光の広がりによって厳しくなる。その結果、スラント角度が小さくても反射モードへの結合が小さくなり、メインバンドを狭くすることができる。

【0026】また、コアの相対光感受率が大きくなると、サイドバンド／メインバンド損失比が小さくなる。理由は以下の通りである。図6にサイドバンドを構成するクラッドモードの電界強度を示したものである。また、導波モードの電界強度もあわせて示されている。コアとクラッドの境界付近のクラッド側において、導波モードは比較強い正の電界強度をもち、サイドバンド内のクラッドモードは負の電界強度をもち、逆向きである。したがって、結合係数が負の値である。一方コア側では、導波モードとクラッドモードが同じ正の電界強度を持ち、向きが同じであって、これらふたつのモードのオーバーラップはコア側では正の値をもつ。したがって、コアにグレーティングが形成されると、コア側とクラッド側でオーバーラップが相殺され、結合係数が小さくなる。

【0027】また、サイドバンド／メインバンド損失比は、コアの外径と正規化周波数にはそれほど大きく依存しておらず、どの条件においても、コアの相対光感受率が0.2付近になるとサイドバンド／メインバンド損失比が大きく減少する傾向がある。

【0028】これらの前提をふまえた上で、実用可能であり、かつ本発明の目的を達成できるスラント型SPGの条件を、メインバンド帯域は10nm以下、サイドバンド／メインバンド損失比を0.2以下とする。このような特性を備えたものは従来、得られていなかったことは言うまでもない。このような特性を備えることにより、光フィルタを作成する際の設計の自由度が高くなる、という効果が得られ、エルビウム(Er)添加光ファイバ増幅器(略称:EDFA)の利得を平坦化(等化)する利得等化器(略称:GEQ)に適用した場合には、利得等化残さが小さくできる、という効果が得られる。そして、コアの外径、コアの相対光感受率、正規化周波数の関係から、この範囲を満足する範囲を求めると、図7に示した範囲となる。なお、この例の計算では7μm以上の範囲を求めているが、実質的にはコアの外径が5μm以上であり、かつ上記の式(1)を満足する範囲である。

【0029】図8は、このような条件で作製したスラント型SPGの一例の透過光の波長スペクトルを示したものである。メインバンド帯域が8.5nmと狭く、サイドバンド／メインバンド損失比が0.18と小さく、好ましい特性が得られていることがわかる。

【0030】なお、このスラント型SPGにおいては、石英ガラスのゲルマニウムとアルミニウムを添加したガラスからコアを形成し、クラッドの第1層Cをゲルマニウムとフッ素を添加した石英ガラスから形成し、第2層Dをフッ素を添加した石英ガラスから形成している。コアの相対光感受率は0.18、正規化周波数は2.3である。また、コアの外径10μm、コアークラッドの比屈折率差0.3%、クラッドの光感受層の外径40μm、クラッド径125μm、モードフィールド径12μm、ブラッグ波長1550nm、グレーティング周期536nm、グレーティング長(グレーティング部の長さ)10mm、スラント角度3度、直径60mmの巻き径の曲げ損失は0.02dBである。

【0031】本実施形態例のスラント型SPGは、コアの外径が5μm以上、好ましくは7μm以上で、前記の式(1)を満足することが条件となるが、さらに、以下の条件を満足すると好ましい。すなわち、コアの相対光感受率は0.1~0.4であると好ましい。この範囲外であると、条件によっては所望の特性が得られない場合がある。また、クラッドの光感受率層の外径は透過損失を十分に得られる様にするという点から、コアの外径aの4倍以上であることが好ましい。また、コアの外径は12μm以下であると好ましい。12μmをこえると曲げ損失が大きくなり不都合である。また、条件によっては所望の特性が得られない場合がある。

【0032】さらに、図7に示した範囲において、コアークラッドの比屈折率差は0.5%以下である。実質的には0.2~0.4%であると好ましい。0.5%をこえると、条件によっては所望の特性が得られない場合がある。また、グレーティングを形成する光ファイバの曲げ損失は、動作波長(好ましくは波長1550nm)において、直径60mmの巻き径で1dB/m以下であると好ましい。さらに好ましくは、波長1550nm、かつ直径40mmの巻き径の条件下の曲げ損失が0.1dB/m以下(さらに好ましくは0.01dB/m以下)である。曲げ損失が大きくなると、モジュールに収納する場合のハンドリング性などが低下するため不都合である。

【0033】また、スラント型SPGに用いる光ファイバの動作波長(本実施形態例において、1500~1600nm、好ましくは1550nm)における導波モードのモードフィールド径は15μm以下であると好ましい。15μmをこえると光の閉じこめが弱く高損失であり、実用に適しない場合がある。また、他のファイバとの接続の際に接続損失が大きくなるおそれがある。なお、曲げ損失とモードフィールド径は、コアの外径に大きく影響され、コアの外径が大きくなれば曲げ損失が大きくなる。また、モードフィールド径も大きくなる。そのため、コアの外径は上述の様に例えば12μm以下が好ましい。

【0034】本実施形態例のスラント型SPGにおいては、グレーティング周期は動作波長の $1/3$ ～半分程度であって、所望の特性によって設定されるが、狭いメインバンド帯域を得るためにはグレーティング周期を一定周期とすると好ましい。また、一定周期の場合はグレーティング長を短くとすると好ましい。グレーティング長が長いと、各クラッドモードへ結合しているスペクトルが細くなり、リップルが大きくなる傾向がある。特に限定するものではないが、好ましくはグレーティング長は $1 \sim 100 \text{ mm}$ 以下、さらに好ましくは 5 mm 以下とされる。 1 mm 未満では、短かすぎて必要な透過損失が得られないおそれがある。 100 mm をこえると、グレーティング部の形成が困難になるばかりでなく、デバイスが大きくなり、モジュールなどに収納する際に不都合を生じるおそれがある。なお、グレーティング長は、フィルタ帯域、透過損失などの光学特性に影響するため、所望の特性を考慮して適宜調整すると好ましい。

【0035】また、クラッドの光感受層の外径は、このスラント型SPGの動作波長（本実施形態例においては $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ 、好ましくは 1550 nm ）の導波モードのモードフィールド径の 1.5 倍以上であると好ましい。なお、上限値は特に限定しないが、実質的には 8 倍以下とされる。 1.5 倍未満では、導波モードが伝搬する領域に光感受層のグレーティング部が形成されないため、十分な損失ピークが得られない場合がある。また、この条件を満足した上で、クラッドの光感受層の外径は $60 \mu\text{m}$ 以下であると好ましい。光感受層はグレーティング形成時に照射される特定波長の光を吸収する傾向があるため、光感受層の外径が大きすぎると、光ファイバの側面から光を照射した場合に、光の照射面と反対側に位置する光感受層の部分に必要な光が照射されず、屈折率の変化が不均一となる場合がある。

【0036】また、クラッドは光感受層を備えていれば、 1 層であっても 2 層以上の多層構造でもよいが、製造性の観点からは、 2 層以上の多層構造とすると好ましい。さらに、光感受性のドーパント、屈折率を調整するためのドーパントの添加量などの条件については設計条件にしたがって適宜変更可能である。また、本実施形態例において、スラント型SPGに用いる光ファイバは、VAD法、MCVD法、PCVD法などの公知の方法によって製造することができ、グレーティング部は、光源としてエキシマレーザなどを用いて公知の方法によって製造することができる。このように、本実施形態例のスラント型SPGは、透過光の波長スペクトルにおいて、メインバンドの帯域が狭く、かつサイドバンド損失が小さいため、狭い帯域に損失ピークが得られる。なお、上述した手順に従ってスラント型SPGを設計して製造すれば、所望の特性を備えたスラント型SPGを確実に製造することができる。

【0037】2. 第2の実施形態例

第1の実施形態例はグレーティング周期が一定周期のものに適用すると好ましく、グレーティング周期が変化するチャープトピッチに適用しても必ずしも十分な効果を得ることができない場合がある。設計条件の自由度を拡大するためには、例えば狭い損失帯域を設定した上で、さらにチャープトピッチを適用して微調整することができると好ましい。第2の実施形態例は、グレーティング周期が一定周期の場合でも、チャープトピッチの場合でも区別なく適用できるものである。

【0038】2-1. 狭い損失帯域を得るための条件：まず、メインバンド帯域を狭くすることができる条件を検討した。上述の様にメインバンド帯域が狭く、サイドバンド損失が比較的小さければ、損失帯域を狭くすることができる。本実施形態例においても、図1に示した構造の光ファイバを用いて種々の条件のスラント型SPGを製造し、その特性を比較した。なお、本実施例のスラント型SPGのグレーティング周期は動作波長などの条件にもよるが、例えば動作波長の $1/3$ ～半分程度とされる。またチャープトピッチにする場合は、チャープ率は 0 よりも大きければよく、例えばチャープ率 20 nm/cm 以下、好ましくは $0.2 \sim 10 \text{ nm/cm}$ とする。チャープ率は光ファイバの長さ方向において、変化させるグレーティング周期の割合を示したものである。特にチャープ率が 20 nm/cm の場合は、グレーティング長約 7 mm で、C-Band、Er添加光ファイバ増幅器の利得を等化するための利得等化のために通常必要な帯域である 40 nm を、十分にカバーできる。なお、チャープトピッチは光ファイバの長さ方向にそって、グレーティング周期を徐々に拡大したり縮小する様に変化させたものである。例えば、グレーティング長と、グレーティング部の長さ方向の中心のグレーティング周期などの基準になるグレーティング周期と、チャープ率と、グレーティング周期を徐々に拡大、あるいは縮小しているかがわかっていれば、グレーティング部の高屈折率部の配列状態を特定することができる。

【0039】本実施形態例においては、図1に示した設計条件において、検討に用いた第1層Cの外径の半径は $15 \mu\text{m}$ 、クラッドの半径は $62.5 \mu\text{m}$ である。また、コア、第1層C、第2層Dはいずれも石英系ガラスから構成し、コアと第1層Cにはゲルマニウムを添加し、各層に、必要に応じて他のドーパントを共添加する点は前記第1の実施形態例と同様である。なお、第1の実施形態例においては、コアに光感受性のドーパントを添加することが必須であるが、第2の実施形態例においては、後述する様に前記式(2)に係る条件を満足すれば、コアに光感受性のドーパントが添加されていなくてもよい場合がある。また、第1の実施形態例においては、クラッドの光感受層がコアに隣接する必要があったが、第2の実施形態例においては、必ずしもコアに隣接

する必要はなく、図 1 に示したグラフにおいて、例えば第 2 層 D を光感受層とすることもできるし、クラッドを 3 層以上から形成し、その中間層を光感受層とすることもできる。

【0040】本実施形態例においては、

①コアの外径 a 、

①正規化周波数 V 、

②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P という 3 つのパラメータの、光学特性への影響について検討した。以下、検討の経緯にそって説明する。なお、第 2 の実施形態例において、コアの相対光感受率 P は、前記クラッド中の最も光感受性の高い光感受層に対する、前記コアの相対光感受率である。すなわち、第 2 の実施形態例において、クラッドには光感受層を 2 層以上設けることができる。コアの相対光感受率は、前記光感受層のうち、最も光感受性の高い（光感受性のドーパントの添加濃度が高い）光感受層に対する相対的な割合で表す。

【0041】また、検討した各数値範囲は以下の通りである。

①コアの外径 a : 4 ~ 10 μm

①正規化周波数 V : 1.7 ~ 2.3

②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P : 0 ~ 0.3

なお、本実施形態例において、スラント型 SPG の動作波長は 1550 nm とした。また、すべての計算条件において、図 24 に示したグレーティング部 4 の高屈折率部 3 の屈折率変化量は 0.001、グレーティング長（グレーティング部 4 の長さ）は 1 mm である。

【0042】まず、①コアの外径 a 、①正規化周波数 V 、②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P 、の 3 つの値の組み合わせを設定し、この設定条件毎に、スラント角度 θ を 0 度から徐々に大きくしていき、反射モード（後進 LP01 モード）への結合による透過損失が極小値（通常は 0 ~ 0.01 dB 程度）となる最初の角度（反射抑制角）をスラント角度 θ とした。スラント角度 θ は他の条件によっても異なるが実質的には 1.5 ~ 8 度、好ましくは 1.5 ~ 6 度である。

【0043】ついで、この①コアの外径 a 、①正規化周波数 V 、②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P 、の 3 つの値の組み合わせとスラント角度を反射抑制角に決定したスラント型 SPG について、導波モードの LP0X モード群および LP1X モード群への結合について、実効屈折率と結合定数の計算を行った。上述の様に、LP0X モード群および LP1X モード群への結合は、メインバンドとサイドバンドを構成するクラッドモード群への結合である。図 9 はこの計算結果の例を示したグラフである。図中の \square は LP0X モード（LP01、LP02...）、 \circ は LP1X モード（LP11、LP12、...）（X は整数）である。なお、メインバン

ドの損失帯域（メインバンド帯域）は、メインバンドの最長波長側に現れる LP11 モードと、損失が最小になる最初の LP1X モードに対応する結合波長との間とする。また、それよりも短波側に結合が生じる帯域をサイドバンドの損失帯域（サイドバンド帯域）とする。

【0044】さらに、この実効屈折率と結合定数を、グレーティング周期を徐々に拡大した形態であって、中心のグレーティング周期が 530 nm で、チャープ率が 0.35 nm/mm の条件のスラント型 SPG の透過損失を作成した場合の結合波長と透過損失に、各モードでの透過損失を伝搬行列を用いて求め、その透過損失和を計算することにより、変換する。そして、図 10 に示した様な波長-透過損失の関係を示したグラフを求める。そして、このグラフから、メインバンド帯域を求める。

【0045】この計算を、①コアの外径 a 、①正規化周波数 V 、②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P 、の 3 つの値の組み合わせを変化させた各スラント型 SPG について行い、メインバンド帯域（nm）をそれぞれ求める。図 11（a）、図 11（b）、図 12（a）、図 12（b）は、正規化周波数 V ごとに、相対光感受率 P とメインバンド帯域との関係を示したグラフである。各グラフには、コアの外径 a の値毎にグラフがまとめられている。

【0046】これらのグラフより、チャープトピッチのスラント型 SPG においては、メインバンド帯域はコアの相対光感受率が大きくなると大きくなり、また、その傾向はコアの半径が小さいほど顕著になることがわかる。コアの相対光感受率が大きいと、グレーティング部を形成したときにコアの屈折率変化量が大きくなる。そのため、反射モードへの結合が生じやすくなる。そして、この反射モードへの結合を防ぐために、スラント角度 θ を大きくする必要が生じる。一方、メインバンド帯域はスラント角度 θ が大きくなると大きくなる傾向があるため、結果としてメインバンド帯域が大きくなる。

【0047】また、これらのグラフより、メインバンド帯域は、コアの外径と正規化周波数にも依存していることが確認できる。すなわち、コアの外径が大きくなるとメインバンドは狭くなり、正規化周波数が小さくなると狭くなる傾向がある。つまり、コアの外径が大きくなるとファイバ断面において光が広がる傾向があり、また、同じコアの半径であれば、正規化周波数が小さいと、コア-クラッド比屈折率差が小さくなって、同様に光が広がる傾向がある。スラント型 SPG においては、ファイバ断面方向にも周期構造が存在するが、断面方向における位相整合条件が光の広がりによって厳しくなる。その結果、スラント角度 θ が小さくても反射モードへの結合が小さくなり、メインバンド帯域を狭くすることができる。

【0048】したがって、図 11（a）～図 12（b）に示したグラフより、メインバンド帯域を狭くするには

コアの相対光感受率を小さくし、コアの外径を大きくし、正規化周波数を小さくすれば良いことが明らかである。ここで、実用可能であり、かつ本発明の目的を達成できるスラント型SPGのメインバンド帯域を10nm以下とする。そして、このメインバンド帯域10nm以下の条件を満足する①コアの外径 a 、①正規化周波数 V 、②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P の関係は、前記式(2)にて表される。

【0049】この関係を満たす様にコアの外径、正規化周波数、コアの相対光感受率を設定すれば、グレーティング周期が一定であると、チャープトピッチであるとは係わらず、メインバンド帯域の狭い透過特性をもつスラント型SPGが得られる。なお、前記式(2)中、相対光感受率 P の数値範囲が0以下または虚数になる場合、相対光感受率 P はゼロとし、コアには光感受性のドーパントを添加しない構成とする。前記式(2)を満足することにより、光フィルタを作成する際の設計自由度が高くなる、という効果が得られる。また、Er添加光ファイバ増幅器の利得を等化する利得等化器に適用した場合には、利得等化残さが小さくできる、という効果が得られる。

【0050】2-2. 透過損失(メインバンドの面積)を大きくするため条件: また、光フィルタとしては、損失帯域を狭くするだけではなく、用途などに応じて、さらに好ましくは「透過損失(メインバンドの面積)を大きくすること」、が必要とされる。効率よく特定波長の光をフィルタリングするためには、導波モードからクラッドモードに結合する光のパワーを大きくしなければならぬからである。グレーティング部の屈折率変化量を大きくすればこの結合する光のパワーは大きくなる。しかし、屈折率変化量の増加には限界がある。例えば屈折率変化量は 1.0×10^{-2} 以下、実質的には $5.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ である。そこで、小さい屈折率変化量によってもクラッドモードに結合する光のパワーが十分に大きくなる特性、が求められる。なお、ここで、小さい屈折率変化量とは、例えば 3×10^{-3} 以下、好ましくは $5.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ である。

【0051】そこで、図10にメインバンドの損失ピークの積分値が大きくなる条件について検討した。積分値は図10に示したグラフ中の斜線部の面積である。すなわち、上述の2-1において説明した様に、図10に示した様な波長-透過損失の関係を示したグラフを求め、これらのグラフのメインバンドの損失ピークの積分値を求める。

【0052】この計算を、スラント角度を反射抑制角とし、①コアの外径 a 、①正規化周波数 V 、②クラッドの光感受層に対するコアの相対光感受率 P 、の3つの値の組み合わせを変化させた各スラント型SPGについて行い、メインバンドの損失ピークの面積の積分値を、数値計算により、それぞれ求めた。なお、積分値の単位はd

$B \cdot nm$ である。ただし、ここで使用している積分値は絶対的な値ではなく、パラメータを変化させたときの透過損失面積の大きさを比較するための相対的な値である。この計算例においては

正規化周波数 $V = 1.9$ 、

コアの外径 $a = 8 \mu m$ 、

コアの相対光感受率 $P = 0$

のときの積分値を12.08と定め、基準としている。

【0053】図13(a)、図13(b)、図14(a)、図14(b)は、正規化周波数 V ごとに、相対光感受率 P とメインバンドの透過損失面積の積分値との関係を示したグラフである。各グラフにおいては、コアの外径 a の値毎にまとめられている。

【0054】これらのグラフより、積分値は相対光感受率が大きいが大きくなる傾向にある。これは、コアの相対光感受率が大きくなると、クラッドモードへの結合効率が大きくなるためである。また、積分値は正規化周波数にも依存し、正規化周波数が小さい方が大きくなる。これは、正規化周波数が小さいと、導波モードが、光感受率の大きいクラッドの光感受層に、より多くしみ出しやすくなるためである。なお、積分値は、同じ正規化周波数であればコアの外径にはほとんど影響を受けないことも確認できる。したがって、積分値を大きくするには、コアの相対光感受率を大きくして、正規化周波数を小さくすればよいことが明らかである。

【0055】ここで、実用可能であり、かつ透過損失が大きい光学特性を得るという目的を達成できることを考慮し、スラント型SPGの積分値を15以上とする。この条件を満足することにより、同一屈折率変化で大きな損失を達成できるため、同じ損失の光フィルタを作成する場合は、短時間の露光時間で作成でき、同じ時間をかけて光を照射して屈折率の変化を生じさせれば、より大きい透過損失を備えた光フィルタを作成できる、という効果が得られる。また、例えばEr添加光ファイバ増幅器の利得を等化する利得等化器に適用した場合には、露光時間の短縮による量産効果が得られる。なお、積分値は大きい程好ましいため、上限値は特に限定しない。この条件を満足するには、コアの相対光感受率が、前記式(3)を満足すると好ましい。なお、前記式(3)中、相対光感受率 P の数値範囲が0以下または虚数になる場合、相対光感受率はゼロとし、コアには光感受性のドーパントを添加しない構成とする。

【0056】また、前記式(2)、前記式(3)の両方を満たすとメインバンド帯域を狭くすることができ、かつ透過損失を大きくすることができ、好ましい。図15(a)は前記式(2)、前記式(3)の両方を満足しない以下の条件で作成したスラント型SPGの波長スペクトルを示したものである。

相対光感受率 $P = 0.2$

正規化周波数 $V = 2.3$

コアの外径 $a = 5 \mu\text{m}$

図 15 (b) は前記式 (2)、式 (3) の両方を満足する以下の条件で作成したスラント型 SPG の波長スペクトルを示したものである。

相対光感受率 $P = 0.1$

正規化周波数 $V = 1.7$

コアの外径 $a = 5 \mu\text{m}$

【0057】図 15 (a) に示した波長スペクトルにおいては、メインバンドとサイドバンドの差はなく、損失ピーク全体が広帯域の略ひとつのピークを形成している。このピークの帯域は 29 nm 、メインバンドの積分値は 1.3 程度であり、小さい。これに対して図 15

(b) に示した波長スペクトルにおいては、サイドバンドに対してメインバンドが充分に大きい。また、メインバンド帯域は 6.5 nm と充分に狭く、メインバンドの損失ピークの積分値は 1.9 であり、充分に大きい。

【0058】2-3. ゴーストモードのピークを抑制するための条件：また、スラント型 SPG は、用途などに応じて、さらに好ましくは「ゴーストモードのピークの抑制」、が必要とされる。図 16 はゴーストモードのピークが存在する透過光の波長スペクトルの一例を示したものである。ゴーストモードとは、導波モードと結合するクラッドモードのうち、長波側において、特に大きく導波モードと結合するクラッドモードのことである。図 16 に示した様に、このゴーストモードのピークが存在すると、長波側が滑らかなフィルタ特性が得られない。

【0059】ゴーストモードのピークは、導波モードと低次のクラッドモードである LP11 モードとの結合の割合が、導波モードと他のモードとの結合に対して大きすぎる場合に発生する。図 17 (a)、図 17 (b)、図 18 (a)、図 18 (b) は、上述の 2-1、2-2 で示した例と同様に、図 1 に示した設計条件で、反射抑制角を設定したチャートピッチのスラント型 SPG において、LP11 モードへの結合定数の、他のモードへの結合定数のうち、一番大きい結合定数に対する比（結合定数比）を、正規化周波数との関係でグラフ化したものである。それぞれの図において、コアの外径 a は一定である。また、各グラフはコアの相対光感受率 P 毎にまとめられている。なお、結合定数比が小さい方がゴーストモードのピークが発生にくくなる。

【0060】これらのグラフより、結合定数比は正規化周波数に大きく依存し、正規化周波数が大きいほど結合定数比が小さくなり、ゴーストモードのピークが発生しやすくなる。これは、正規化周波数が大きくなると、LP11 モードの電界分布がコア付近で強くなり、LP11 モードの電界分布と導波モードの電界分布との重なりが大きくなるためである。図 19 (a) はコアの外径 a が $8 \mu\text{m}$ 、正規化周波数が 1.7 の場合、図 19

(b) はコアの外径 a が $8 \mu\text{m}$ 、正規化周波数が 2.3 の場合の LP11 モードと導波モードの電界分布を示し

たグラフである。

【0061】ここで、ゴーストモードのピークが殆ど問題とならない範囲として、結合定数比を 0.2 以下と規定する。この条件を満足することにより、長波長側もなめらかな特性の光フィルタが得られる。また、Er 添加光ファイバ増幅器の利得を等化する利得等化器に適用した場合はフィルタ帯域がより細く、長波長側もなめらかなフィルタ特性が得られる。

【0062】この条件を満足するには、コアの相対光感受率が、前記式 (4) を満足すると好ましい。なお、前記式 (4) 中、相対光感受率 P の数値範囲が 0 以下または虚数になる場合、相対光感受率はゼロとし、コアには光感受性のドーパントを添加しない構成とする。

【0063】図 20 (a) は、前記式 (4) を満たさない、以下に示した条件でスラント型 SPG を形成した場合の波長スペクトルの一例を示したものである。

正規化周波数 $V = 2.3$ 、

コアの外径 $a = 7 \mu\text{m}$ 、

コアの相対光感受率 $P = 0.15$

【0064】図 20 (b) は、前記式 (4) を満足する、以下に示した条件でスラント型 SPG を形成した場合の波長スペクトルの一例を示したものである。

正規化周波数 $V = 1.7$ 、

コアの外径 $a = 7 \mu\text{m}$ 、

コアの相対光感受率 $P = 0.1$

これらのグラフを比較すると、前記式 (4) を満たすことにより、ゴーストモードのピークが低減することが明らかである。

【0065】なお、第 2 の実施形態例において、これら 2-1~2-3 に示した 3 つの条件は、1 つ以上満たしていればよく、好ましくは 2 つ満足し、最も好ましくは 3 つの条件を全て満足することが望ましい。

【0066】2-4. サイドバンドの損失ピークを抑制するための条件：上述の第 1 の実施形態例において説明した様に、光フィルタとしては、メインバンドとサイドバンドの透過損失の差が小さい程、設計の自由度が高くなり、好ましい。したがって、「サイドバンドの損失ピークの抑制」が求められる。ここで、第 1 の実施形態例は、グレーティング周期が一定の場合に適用できる条件であるが、本実施形態例においては、グレーティング周期が一定であると、チャートピッチであるに限らず、適用することができる。

【0067】図 21 (a)、図 21 (b)、図 22

(a)、図 22 (b) は、上述の 2-1~2-3 と同様に、反射抑制角を設定したチャートピッチのスラント型 SPG において、メインバンドに対するサイドバンドの、dB 表示した透過損失比（サイドバンド/メインバンド損失比）と、コアの外径 a との関係を示したグラフである。それぞれの図において、正規化周波数 V は一定である。また、各グラフはコアの相対光感受率 P 毎にま

とめられている。

【0068】これらのグラフより、サイドバンド／メインバンド損失比は正規化周波数やコアの外径にはほとんど依存せず、コアの相対光感受率にのみ影響を受けることがわかる。また、第1の実施形態例について、図6に示したグラフを用いて説明した様に、サイドバンド／メインバンド損失比を小さくするには、コアの相対光感受率が大きい方が好ましい。サイドバンド／メインバンド損失を0.1以下とするためには、コアの相対光感受率を0.2以上に設定することが必要とされる。このような特性を備えることにより、より広帯域なフィルタ特性の設計自由度が高くなるという効果が得られる。また、E_r 添加光ファイバ増幅器の利得を等化する利得等化器に適用した場合には、広帯域において、利得等化の残さが小さくなるという効果が得られる。

【0069】図23(a)は、以下に示した条件でスラント型SPGを形成した場合の波長スペクトルの一例を示したものである。

正規化周波数 $V=1.7$ 、

コアの外径 $a=7\mu\text{m}$ 、

コアの相対光感受率 $P=0.00$

図23(b)は、以下に示した条件でスラント型SPGを形成した場合の波長スペクトルの一例を示したものである。

正規化周波数 $V=1.7$ 、

コアの外径 $a=7\mu\text{m}$ 、

コアの相対光感受率 $P=0.25$

これらのグラフより、コアの相対光感受率 P を0.2以上にすると、サイドバンドを抑制できることが明らかである。なお、この条件は、前記式(2)～(4)のうち、少なくとも1つを満足した上で、満足すべきものである。

【0070】2-5. その他の光学特性について：また、本実施形態例において、スラント型SPGに使用する光ファイバの曲げ損失は、波長1550nmにおいて、直径60mmの巻き径で1dB/m以下であると好ましい。さらには、直径40mmの巻き径で0.1dB/m以下（さらに好ましくは0.01dB/m以下）であると好ましい。曲げ損失が大きくなると、モジュールに収納する場合のハンドリング性などが低下するため不都合である。また、光ファイバの動作波長（例えば1500～1600nm、好ましくは1550nm）におけるモードフィールド径は15μm以下であると好ましい。15μmをこえると光の閉じこめが弱くなり、損失が大きくなるため、実用に適しない場合がある。また、他のファイバとの接続の際に接続損失が大きくなるおそれがある。なお、曲げ損失とモードフィールド径は、コアの外径 a に大きく影響され、コアの外径 a が大きくなれば曲げ損失が大きくなる。また、モードフィールド径も大きくなる。そのため、コアの外径 a は例えば12μ

m以下にすることが好ましい。

【0071】また、クラッドの光感受層の外径は、このスラント型SPGの動作波長（例えば1500～1600nm、好ましくは1550nm）における導波モードのモードフィールド径の1.5倍以上であると好ましい。なお、上限値は特に限定しないが、実質的には8倍以下とされる。1.5倍未満では、導波モードが伝搬する領域に光感受層のグレーティング部が形成されないため、導波モードの十分な透過損失が得られない場合がある。また、この条件を満足した上で、クラッドの光感受層の外径は60μm以下であると好ましい。光感受層はグレーティング形成時に照射される特定波長の光を吸収する傾向があるため、光感受層の外径が大きすぎると、光ファイバの側面から光を照射した場合に、光の照射面と反対側に位置する光感受層の部分に充分な光が照射されず、屈折率を十分に上昇させることができず、屈折率の変化が不均一となる場合がある。

【0072】グレーティング長は1～100mmであると望ましい。1mm未満では、短すぎて必要な透過損失が得られないおそれがあり、得られない。100mmをこえると、グレーティング部の形成が困難になるばかりでなく、デバイスが大きくなり、モジュールなどに収納する際に不都合を生じるおそれがある。なお、グレーティング長は、帯域損失などの光学特性に影響するため、所望の特性を考慮して適宜調整すると好ましい。

【0073】また、クラッドは光感受層を備えていれば、1層であっても2層以上の多層構造でもよいが、製造性の観点からは、2層以上の多層構造とすると好ましい。さらに、光感受性のドーパント、屈折率を調整するためのドーパントの添加量などの条件については設計条件にしたがって適宜変更可能である。また、本実施形態例において、スラント型SPGに用いる光ファイバは、VAD法、MCVD法、PCVD法などの公知の方法によって製造することができ、グレーティング部は、光源としてエキシマレーザなどを用いて公知の方法によって製造することができる。

【0074】なお、正規化周波数 V と理論カットオフ波長 λ_c は以下の式(5)で表すことができる。

【数10】

$$\lambda_c = \frac{V}{V_c} \lambda \quad \dots(5)$$

式中、 λ_c は理論カットオフ波長、 V_c は2.4048256の定数、 λ は動作波長であって、本実施形態例においては、例えば1500～1600nm、好ましくは1550nmである。したがって、正規化周波数 V の値などを前記式(5)に代入して λ_c の値を求めることにより、正規化周波数 V にかえて、 λ_c を用いて本発明の条件を説明することもできる。なお、実際のスラント型SPGのカットオフ波長は、理論 λ_c ではなく、実行カ

ットオフ波長を用いて評価される場合が多く、実行カットオフ波長は JISC 6825 の 8. 2. 3 で定められており、理論カットオフ波長よりも短い値となる。

【0075】なお、上述した手順に従い、前記式(2)～(4)の少なくともひとつの条件(好ましくは2つ以上、最も好ましくは3つ)を満足する様にスラント型SPGを設計し、スラント型SPGを製造すれば、所望の特性を備えたスラント型SPGを確実に得ることができる。

【0076】3. スラント型SPGの用途について：第1乃至第2の実施形態例のスラント型SPGは、スラント型であるため、反射光が小さいという利点がある。また、条件の選択によっては、狭帯域で滑らかなスペクトル特性が得られる。また上述の条件を組み合わせることにより、種々の光学特性をもつものを設計することができる。そのため光増幅器の利得の波長依存性を等価化する利得等化器に適用し、当該光増幅器と利得等化器を備えた光増幅器モジュールを構成すると好ましい。光増幅器としては、波長1550nm付近の光信号の増幅に適しているEr添加光ファイバを用いたEr添加光ファイバ増幅器が好適に用いられる。

【0077】なお、従来、かかる利得等化器には長周期グレーティングやエタロンなどが用いられている。例えば長周期グレーティングは、異なる波長域にて光を損失する特性を備えたものを、複数、直列に接続して利得等化器とされる。そして、Er添加光ファイバ増幅器とこの様な利得等化器とが組み合わされて、光ファイバ増幅器モジュールが構成される。

【0078】なお、ひとつの長周期グレーティングで得られる損失ピークは略三角形の釣り鐘型である。そのため、利得等化器の波長スペクトルにおいては、細い略三角形のピークが複数並んだ形状の損失ピークが得られる。したがって、光ファイバ増幅器モジュールを透過した光の波長スペクトルにおいては、複数の損失ピークの間に、利得を平坦化することができなかつたいわゆる利得残さが存在する。一方、この様な光ファイバ増幅器モジュールを複数、多段に、直列に接続した長距離伝送用の光通システムがある。なお、光通信システムは、その一方の端部には光信号を発信する送信部、他方の端部には光信号を受信する受信部が設けられたものである。光増幅器モジュールは、これら送信部と受信部をつなぐ光伝送路中に挿入される。このシステムを構成する個々の光ファイバ増幅器モジュールを透過することによって生じる利得残さは、それぞれ同じ波長帯域に存在している。したがって、複数の光ファイバ増幅器モジュールを透過することにより、利得残さが蓄積し、伝送特性に影響する。そこで、従来は、光ファイバ増幅器モジュール10～20個毎に、集中等化器を挿入して、蓄積した利得残さを除去していた。そのため、コストの面で問題となっていた。しかし、本発明のスラント型SPGは、L

PGを用いる場合と比べて任意の透過損失が得られる。そのため、例えばEr添加光ファイバ増幅器と、本発明のスラント型SPGとを組み合わせる光ファイバ増幅器モジュールを構成すれば、Er添加光ファイバ増幅器の利得をより精度よく等化して、利得残さを減少させることができる。その結果、集中利得等化器の数を大幅に低減して、光通信システムの低コスト化を図ることができる。

【0079】なお、利得の等化が必要とされるEr添加光ファイバ増幅器の波長帯域は10nm～45nmである。また、グレーティング周期が一定のスラント型SPGの損失ピークが得られる帯域は、例えば5nm～10nmである。これをEr添加光ファイバ増幅器の利得等化帯域10～45nmの範囲に広げるためには、チャープピッチとし、微調整すると好ましい。チャープ率は0よりも大きければよく、利得等化帯域とグレーティング長の関係で、20nm/cm以下が好ましい。また、フィルタ形状(損失ピークの形状)の制御性の点から実質的には0.2nm/cm以上であると好ましい。この様な光増幅器モジュールは、種々の光通信システムに適用することができる。例えば分散シフト光ファイバなどを用いて長距離、波長多重伝送などを行いにおいて、伝送路の途中にかかる光増幅器モジュールを挿入し、光信号を増幅しながら光通信を行う光通信システムなどに適用することができる。

【0080】

【発明の効果】以上説明したように、本発明においては、透過光の波長スペクトルにおいて、狭い損失帯域を備えたスラント型SPG、ゴーストモードのピークを低減したスラント型SPG、サイドバンドの透過損失の低減を図ることができるスラント型SPGを提供することができる。したがって、自由に光学特性を設計することができるため、Er添加光ファイバ増幅器などの種々の光デバイスの光学特性の調整に用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 光ファイバの屈折率プロファイルと相対光感受率プロファイルの設計条件を示したグラフである。

【図2】 第1の実施形態例の結合波長と透過損失の計算結果例を示したグラフである。

【図3】 図3(a)、図3(b)は、第1の実施形態例に係るコアの相対光感受率とメインバンド帯域との関係と、コアの相対光感受率とサイドバンド/メインバンド損失比との関係を示したグラフである。

【図4】 図4(a)、図4(b)は、第1の実施形態例に係るコアの相対光感受率とメインバンド帯域との関係と、コアの相対光感受率とサイドバンド/メインバンド損失比との関係を示したグラフである。

【図5】 図5(a)、図5(b)は、第1の実施形態例に係るコアの相対光感受率とメインバンド帯域との関係と、コアの相対光感受率とサイドバンド/メインバン

ド損失比との関係を示したグラフである。

【図6】 サイドバンドを構成するクラッドモードの電界強度を示したグラフである。

【図7】 第1の実施形態例のスラント型SPGの特性を満足する3つのパラメータの範囲を示したグラフである。

【図8】 第1の実施形態例のスラント型SPGの透過光の波長スペクトルの一例を示したグラフである。

【図9】 第2の実施形態例のスラント型SPGにおいて、実行屈折率と結合定数の関係を計算した結果を示したグラフである。

【図10】 第2の実施形態例における波長-透過損失特性の関係の一例を示したグラフである。

【図11】 図11(a)、図11(b)は第2の実施形態例において、コアの相対光感受率-メインバンド帯域の関係の一例を示したグラフである。

【図12】 図12(a)、図12(b)は第2の実施形態例において、コアの相対光感受率-メインバンド帯域の関係の一例を示したグラフである。

【図13】 図13(a)、図13(b)は第2の実施形態例において、コアの相対光感受率-メインバンド帯域の関係の一例を示したグラフである。

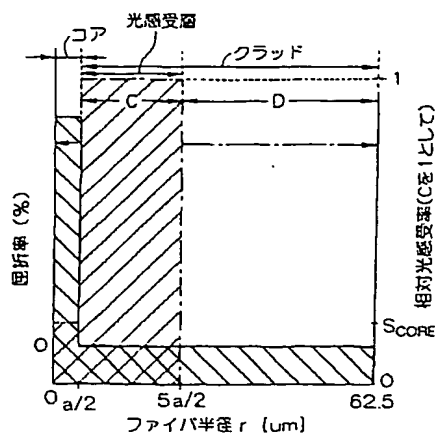
【図14】 図14(a)、図14(b)は第2の実施形態例において、コアの相対光感受率-積分値の関係の一例を示したグラフである。

【図15】 図15(a)、図15(b)は第2の実施形態例において、コアの波長-透過損失の関係の一例を示したグラフである。

【図16】 ゴーストモードのピークが存在するスラント型SPGの波長スペクトルの例を示したグラフである。

【図17】 図17(a)、図17(b)は第2の実施形態例において、正規化周波数-結合定数比の関係の一例を示したグラフである。

【図1】



【図18】 図18(a)、図18(b)は第2の実施形態例において、正規化周波数-結合定数比の関係の一例を示したグラフである。

【図19】 図19(a)、図19(b)は、LP11モードと導波モードの電界分布を示したグラフである。

【図20】 図20(a)、図20(b)は、第2の実施形態例において、ゴーストモードのピークが存在する例と存在しない例を示したグラフである。

【図21】 図21(a)、図21(b)は、第2の実施形態例において、コアの外径-サイドバンド/メインバンド損失比を示したグラフである。

【図22】 図22(a)、図22(b)は、第2の実施形態例において、コアの外径-サイドバンド/メインバンド損失比を示したグラフである。

【図23】 図23(a)、図23(b)は、第2の実施形態例において、サイドバンドが大きい場合の例と小さい場合の例を示したグラフである。

【図24】 スラント型SPGの構成の一例を示した説明図である。

【図25】 図25(a)、図25(b)は、スラント角度を変化させたときのスラント型SPGの波長スペクトルの一例を示したグラフである。

【図26】 図26(a)、図26(b)は、スラント角度を変化させたときのスラント型SPGの波長スペクトルの一例を示したグラフである。

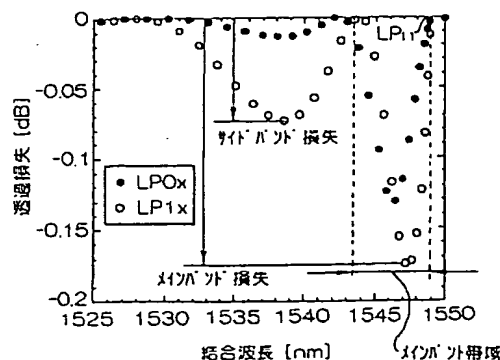
【図27】 従来のスラント型SPGの波長スペクトルの一例を示したグラフである。

【図28】 サイドバンドとメインバンドが存在するスラント型SPGの波長スペクトルの一例を示したグラフである。

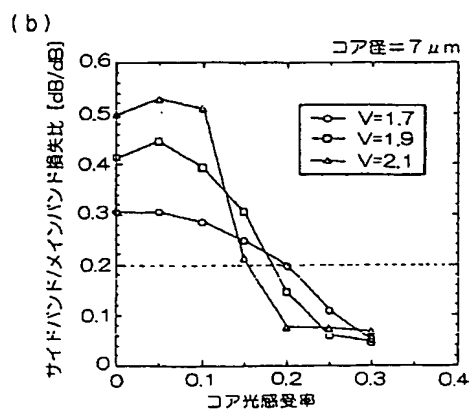
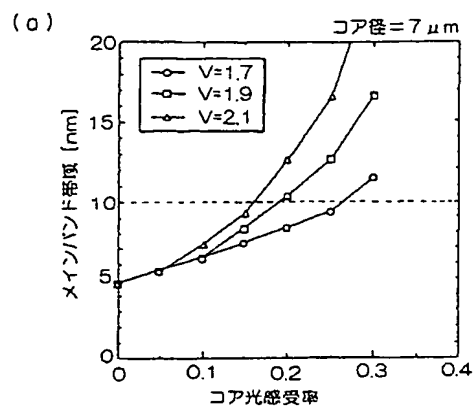
【符号の説明】

1…コア、2…クラッド、3…高屈折率部、4…グレーティング部。

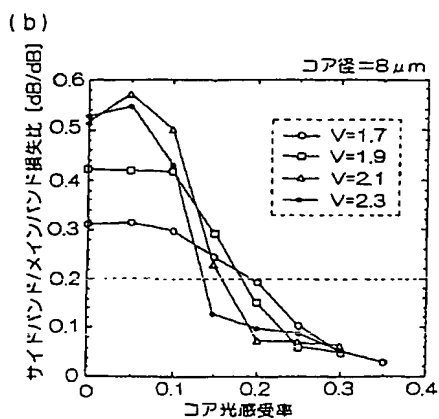
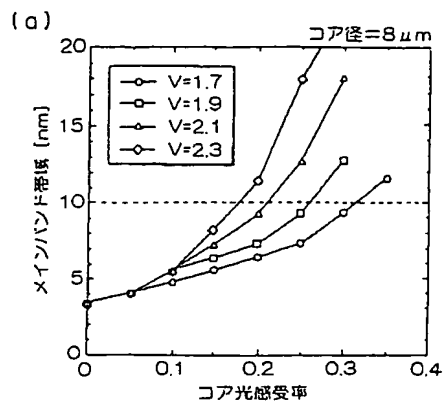
【図2】



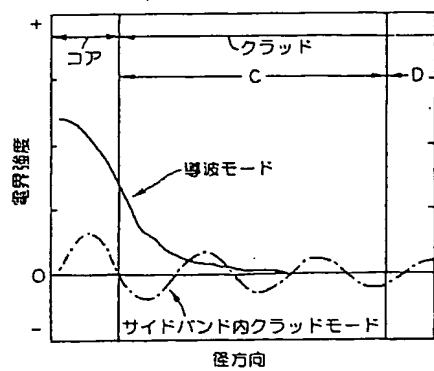
【図 3】



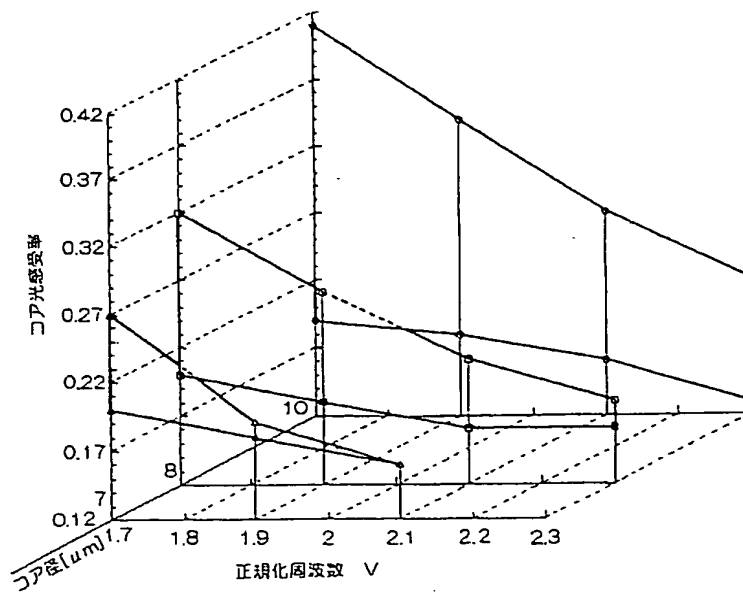
【図 4】



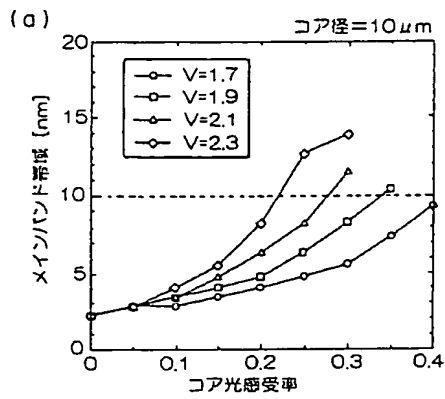
【図 6】



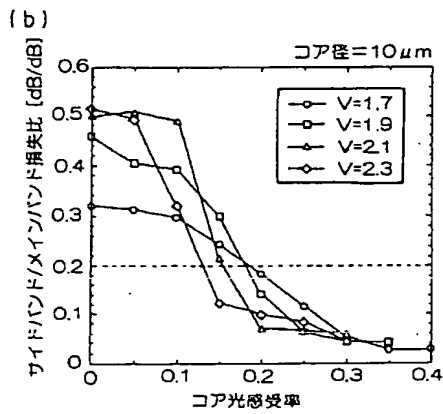
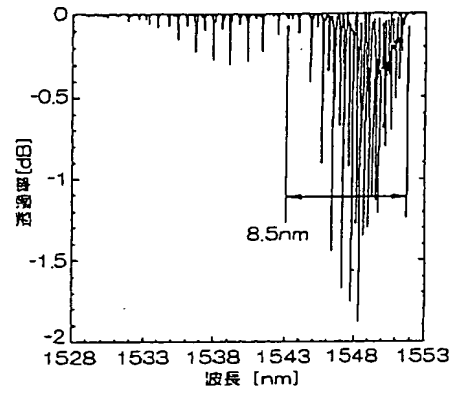
【図 7】



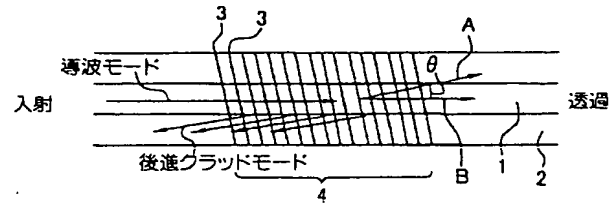
【図5】



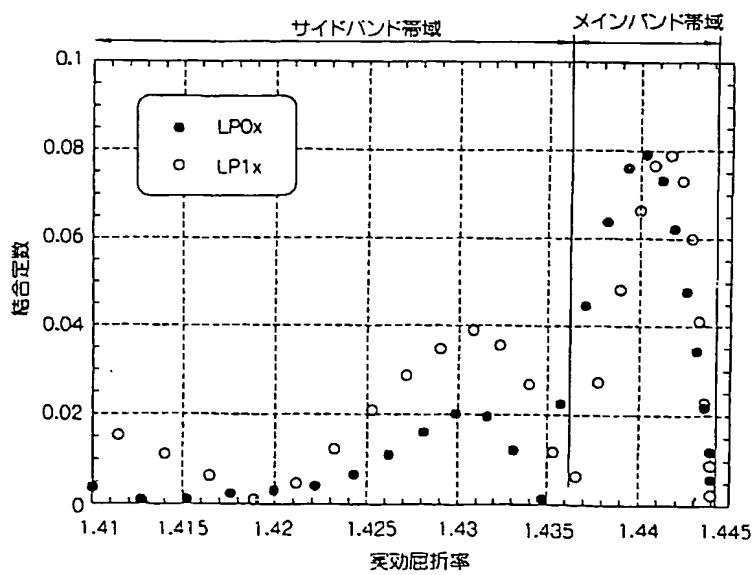
【図8】



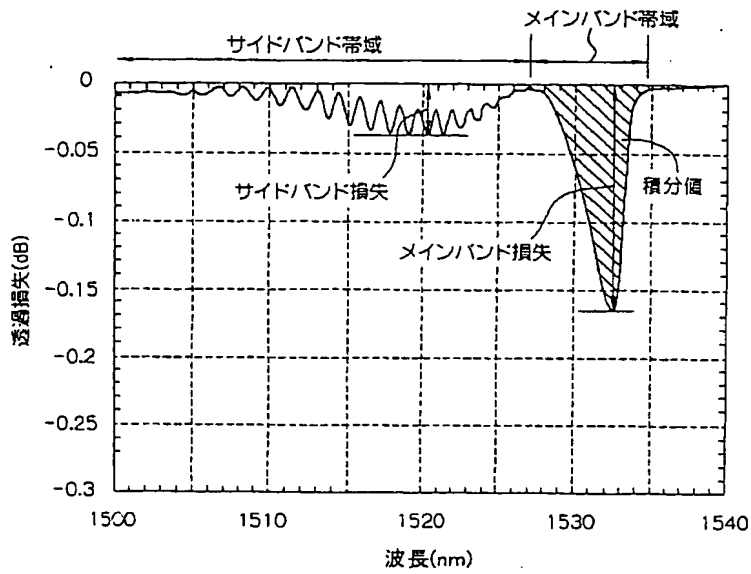
【図24】



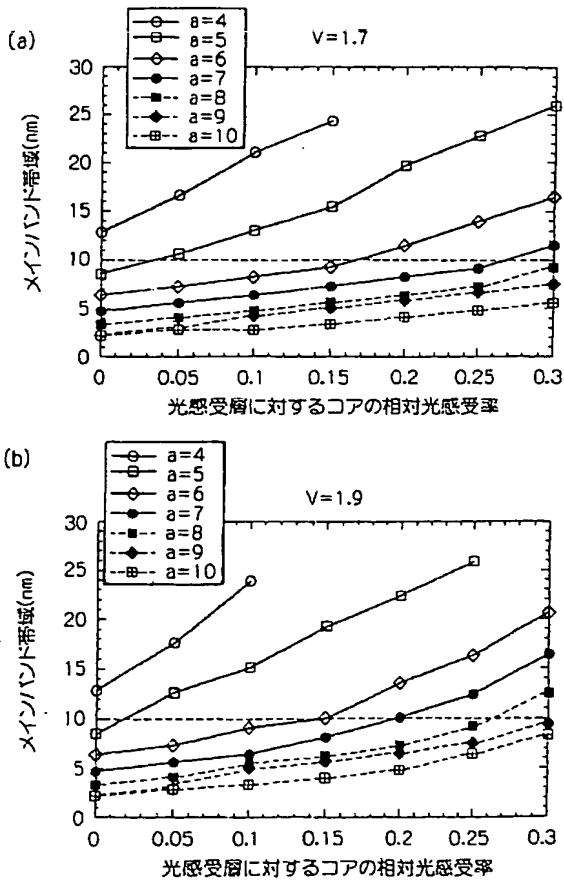
【図9】



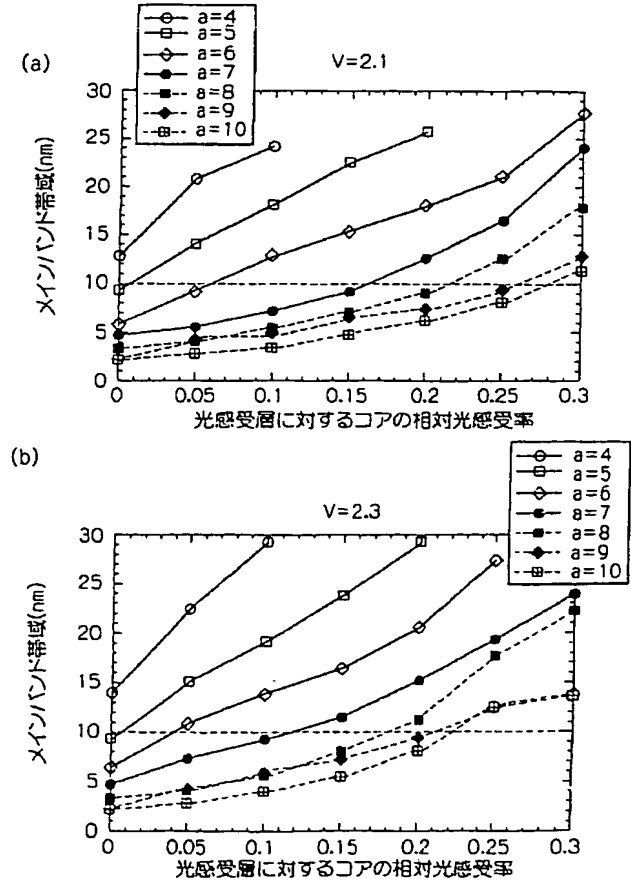
【図10】



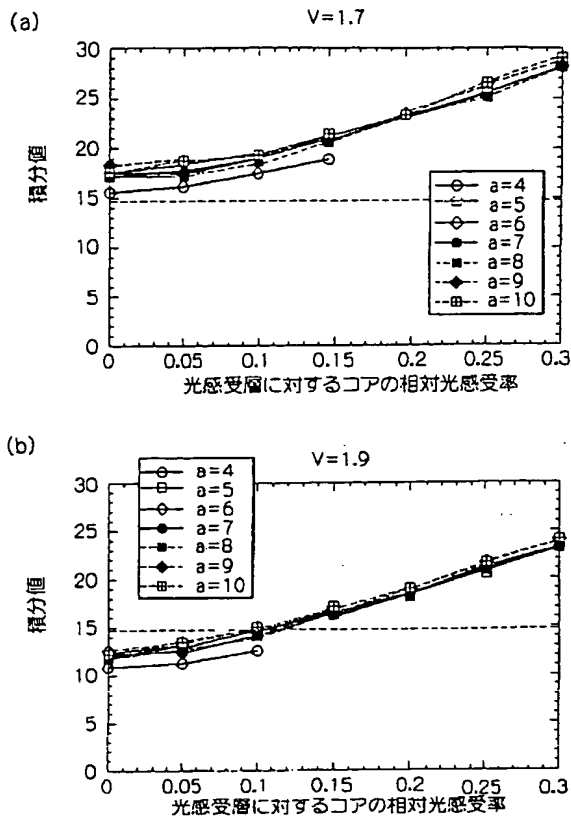
【図11】



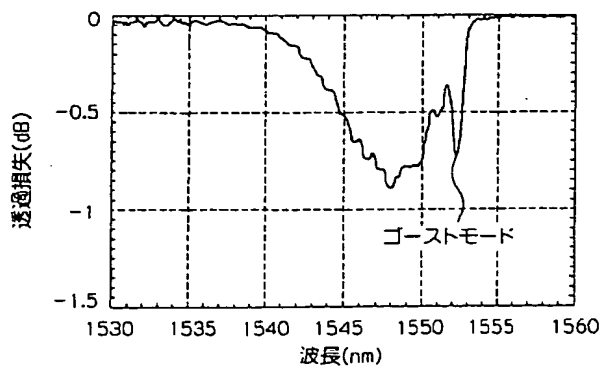
【図12】



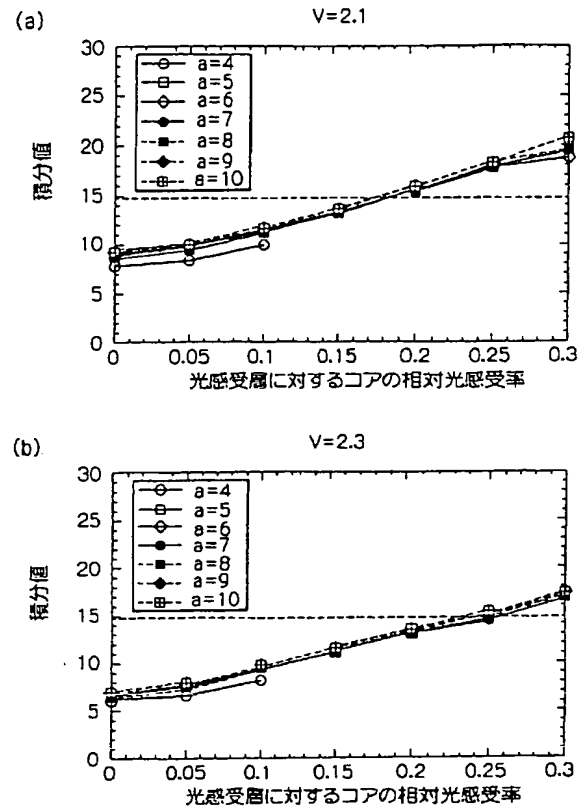
【図 13】



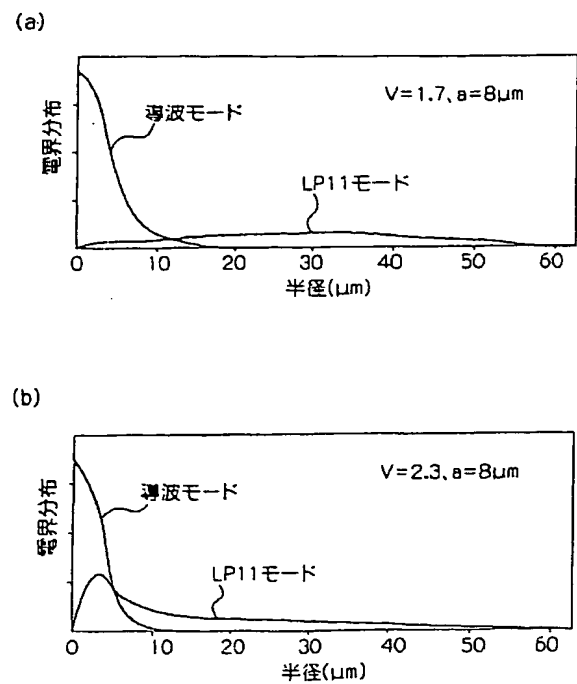
【図 16】



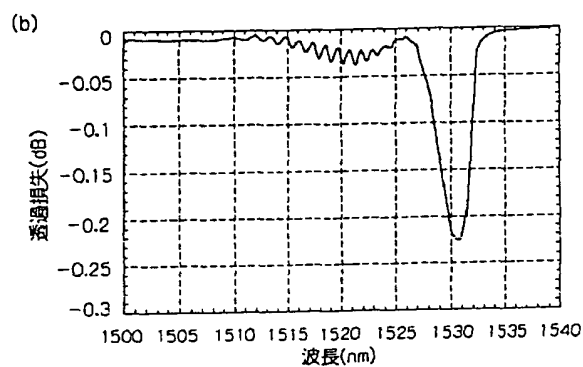
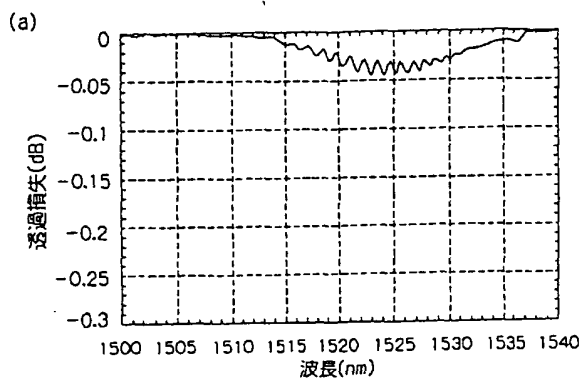
【図 14】



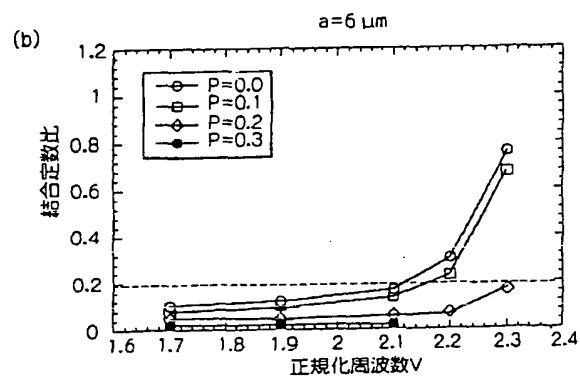
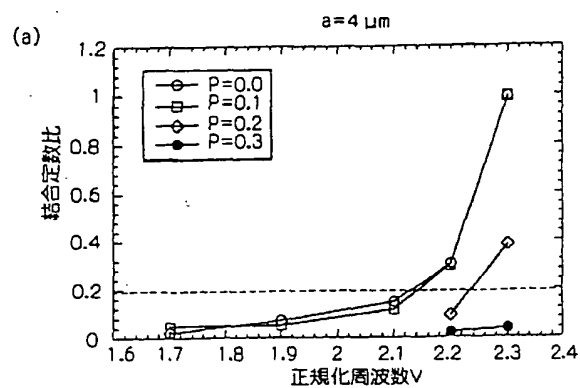
【図 19】



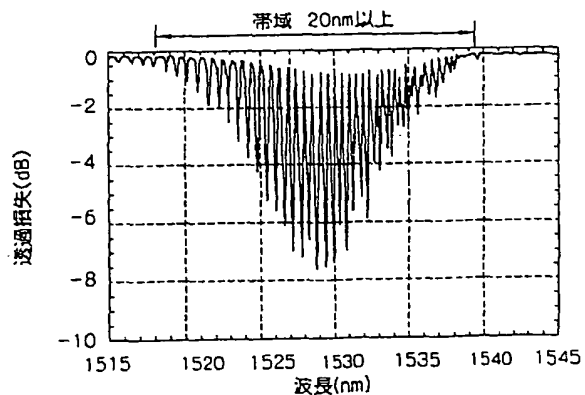
【図 15】



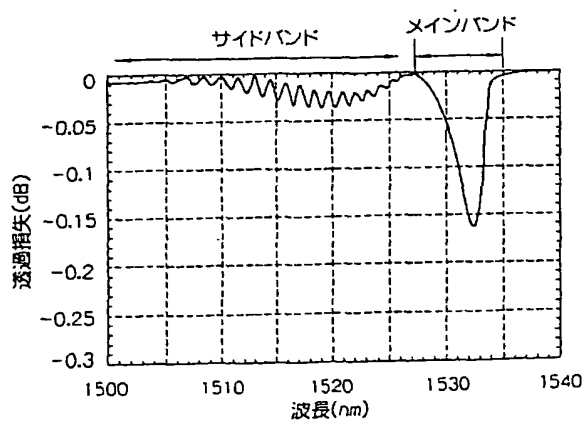
【図 17】



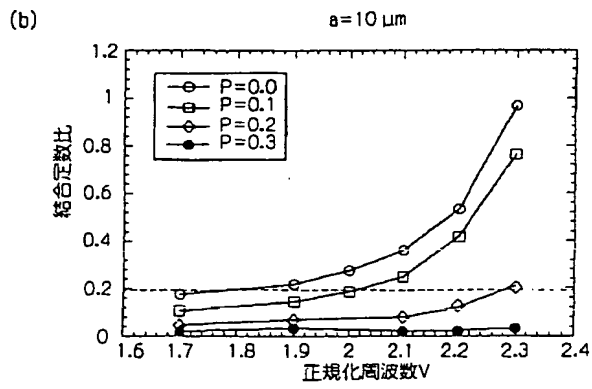
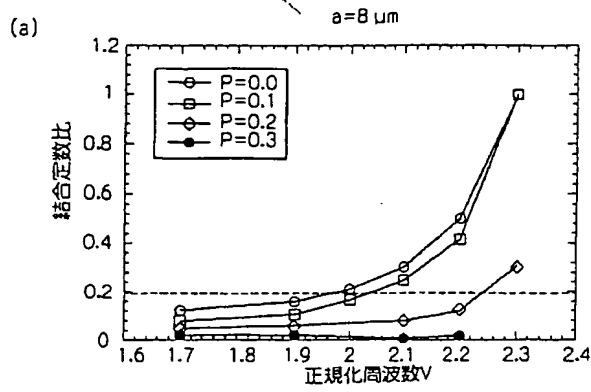
【図 27】



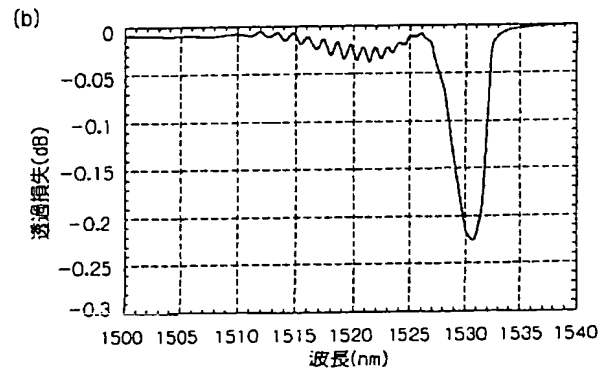
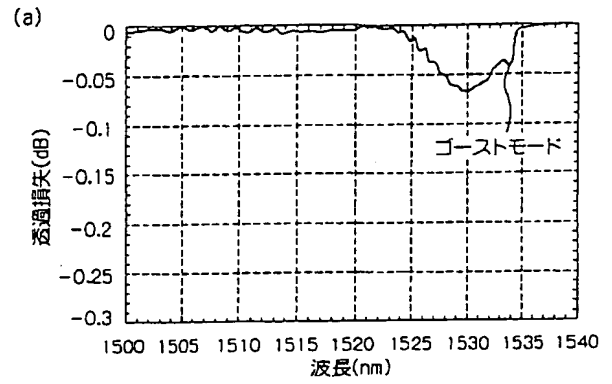
【図 28】



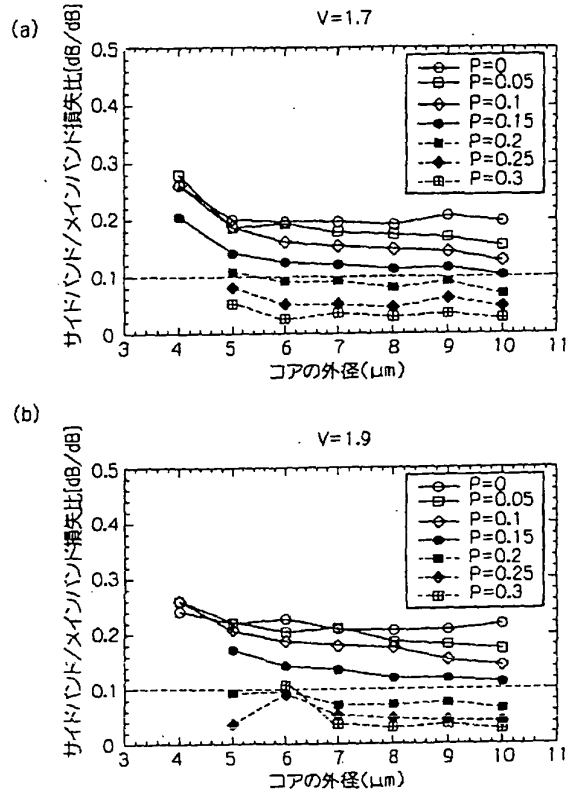
【図 18】



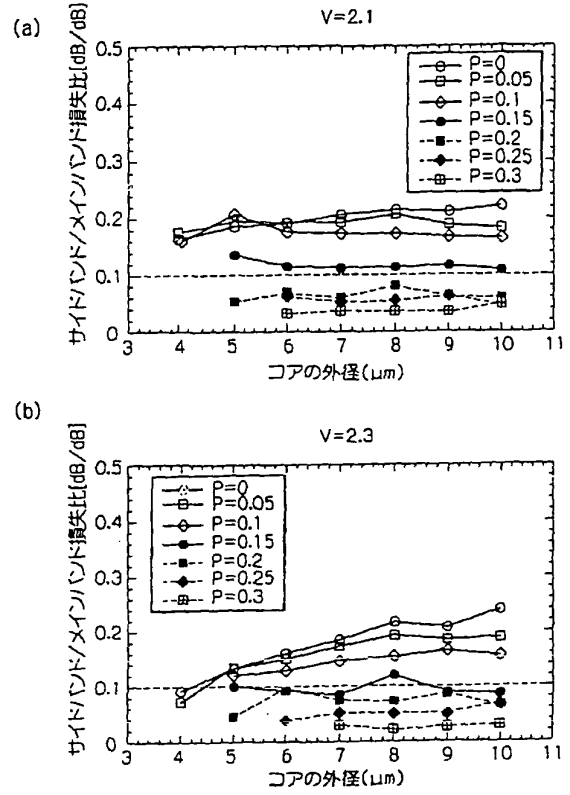
【図 20】



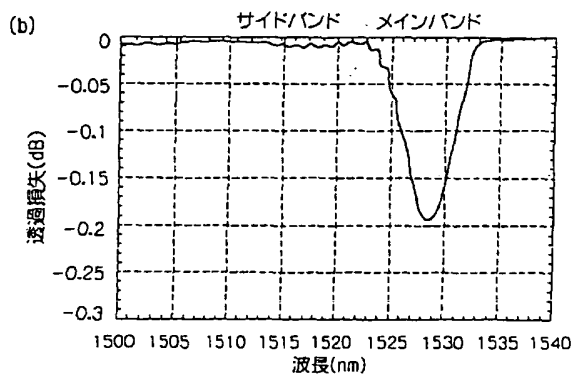
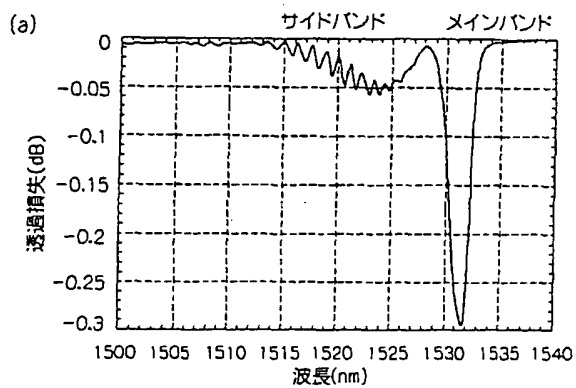
【図21】



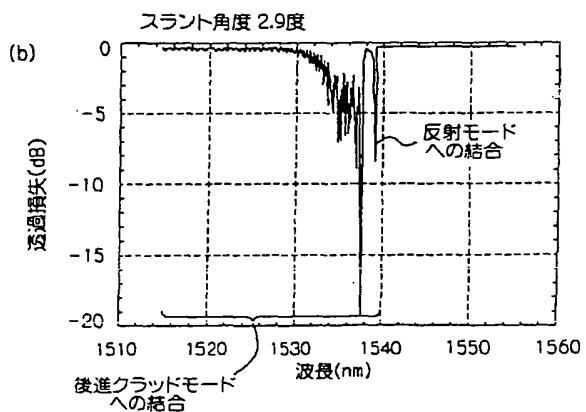
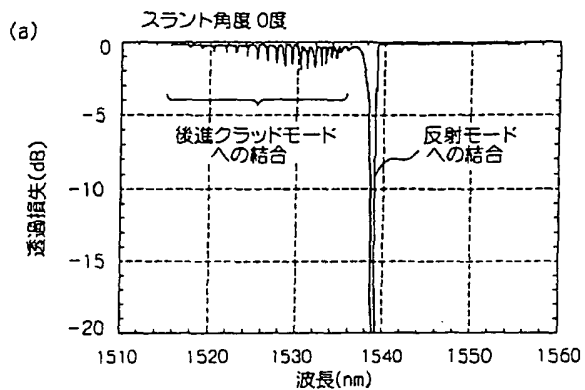
【図22】



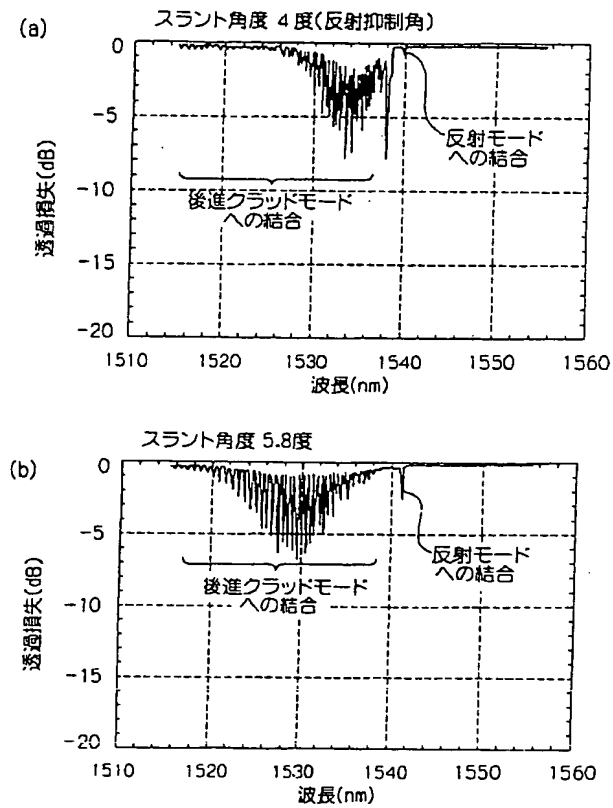
【図 23】



【図 25】



【図26】



フロントページの続き

(72)発明者 小島 玲子
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内
(72)発明者 稲田 具貞
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内

(72)発明者 奥出 聡
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内
(72)発明者 西出 研二
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内

Fターム(参考) 2H050 AB07 AB08 AC82 AC84